

$$Y_2 = 0,8051 + 0,0426 \left( \frac{N}{S} - 1,8592 \right)^2 + 2,8689 * 10^{-5} \left( \frac{A}{nL} - 91,6728 \right)^2 - 4900 \left( \frac{S_{удс}}{L} - 0,01394 \right)^2 - 1596 \left( \frac{S_{тр}}{S} - 0,01151 \right)^2, \quad \frac{ДТП}{1000 \text{ жит.}}, \quad (2)$$

$$Y_3 = 0,367 \left( \frac{A}{nL} \right)^{1,076}, \quad \frac{ДТП}{100 \text{ км}}, \quad (3)$$

де  $A$  – кількість зареєстрованих у місті легкових автомобілів, од.;  $n$  – частка легкових автомобілів від загального парку автомобілів у місті;  $L$  – довжина вулиць з твердим покриттям, км;  $N$  – чисельність населення в місті, тис. жит.;  $S$  – площа міста, км<sup>2</sup>;  $l$  – довжина найбільшої осі міста, км;  $S_{удс}$  – площа вулиць з твердим покриттям, км<sup>2</sup>;  $S_{тр}$  – площа пішохідних доріжок і тротуарів, км<sup>2</sup>.

Використання наведених вище моделей дозволяє спрогнозувати ситуацію з БР у місті при прийнятті яких-небудь містобудівних рішень. Отримані при цьому результати можуть бути основою для наступного синтезу заходів щодо попередження ДТП у місті й визначення доцільності їхнього застосування.

1.Савниний Ю. А. Дорожно-транспортная сеть и безопасность движения пешеходов. – М.: Транспорт, 1984. – 72 с.

2.Романов А.Г. Дорожное движение в городах: закономерности и тенденции. – М.: Транспорт, 1984. – 80 с.

3. Волошин Г.Я., Мартынов В.П., Романов А.Г. Анализ дорожно-транспортных происшествий. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.

Отримано 25.04.2008

УДК 625.03

В.П.ШПАЧУК, д-р техн. наук, А.В.КОВАЛЕНКО, канд. техн. наук  
Харківська національна академія міського господарства

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАГОНА З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ З ВЕРХНЬОЮ БУДОВОЮ КОЛІЇ В ЗОНІ СТИКОВОЇ НЕРІВНОСТІ

Розглядаються питання оптимізації експлуатаційних і конструктивних параметрів вагона і верхньої будови колії (оптимальні швидкість руху вагона і ексцентриситет стикового зазору) з урахуванням їх взаємодії в зоні стикової нерівності.

Взаємодія транспортного засобу з рейковою колією в місці стику обумовлює виникнення інтенсивних динамічних навантажень в елементах конструкції екіпажа, навісних вузлах і агрегатах, що призводить до зниження міцності, довговічності і надійності в експлуатації, погіршенню показників плавності ходу, викликає розлади і дефекти колій,

служить причиною осідань, перекосів і виплесків, призводить до зминання торців рейок, наклепам, виколам, а також утворенню козирків і тріщин [1-5, 9].

У роботах [5,6] показано, що на практиці найбільш перспективним, з погляду зниження ударної взаємодії колеса з приймаючою рейкою, є несиметричний стик: істотно підвищується стабільність роботи вагона, колії та ін. Також запропоновані геометричні рішення і функціональні залежності між квадратом швидкості руху транспортного засобу й ексцентриситетом несиметричного стику з урахуванням відстані між осями шпал при нормальній шпальній епюрі. При цьому параметри динамічної взаємодії знижуються впливом на кількість шпальних грат: замість чотирьох нормальних шпальних грат виконується п'ять зі зменшеним на 20% міжосьовою відстанню між шпалами.

Однак дослідження показують, що при цьому не враховуються механічні і геометричні характеристики вагона і верхньої будови колії, а також залежність величини ударного імпульсу в місці стику від швидкості руху вагона, жорсткості його амортизаторів, завантаження, а також залежних від завантаження вагона висоти стику та ін. [1, 7-9]. Встановлено, наприклад [7,8], що при зміні швидкості руху вагона і висоти стику в діапазоні  $V_x = [1 \div 15]$  м/с,  $h = [1 \div 12]$  мм діапазон зміни ударного імпульсу складає  $S_{\text{дл}} = [82,9 \div 4642,1]$  Н·с.

Відповідно до викладеного, в даній роботі розглянута задача оптимізації експлуатаційних і конструктивних параметрів транспортного засобу і верхньої будови колії з урахуванням їх механічної взаємодії в зоні стикової нерівності.

#### *Загальна механічна постановка задачі дослідження*

Розв'язати задачу визначення величини швидкості руху транспортного засобу в зоні стикової нерівності, що мінімізує максимальний прогин приймаючої рейки під першою шпалою рейкової колії на фазі його зростання. При цьому як задані параметри прийняти механічні і геометричні параметри вагона і верхньої будови колії, врахувати перші п'ять власних форм коливань рейки, а в якості варійованих – прийняти ексцентриситет "e" стикового зазору.

Розрахункова схема задачі приведена на рис.1. Тут умовні позначки відповідають прийнятим у роботах [1,7-9].

#### *Математична постановка задачі дослідження*

$$\text{Знайти } \min_{V_x, e} \left( \max_t w(t, x = l_{\text{пр.п.1}}(e)) \right)$$

при  $w(t, x = l_{\text{пр.п.1}}(e)) \leq [w(t, l_{\text{пр.п.1}})]$ ,  $e \leq 0,5$ ,  $V_x = [1 \div 15]$  м/с,

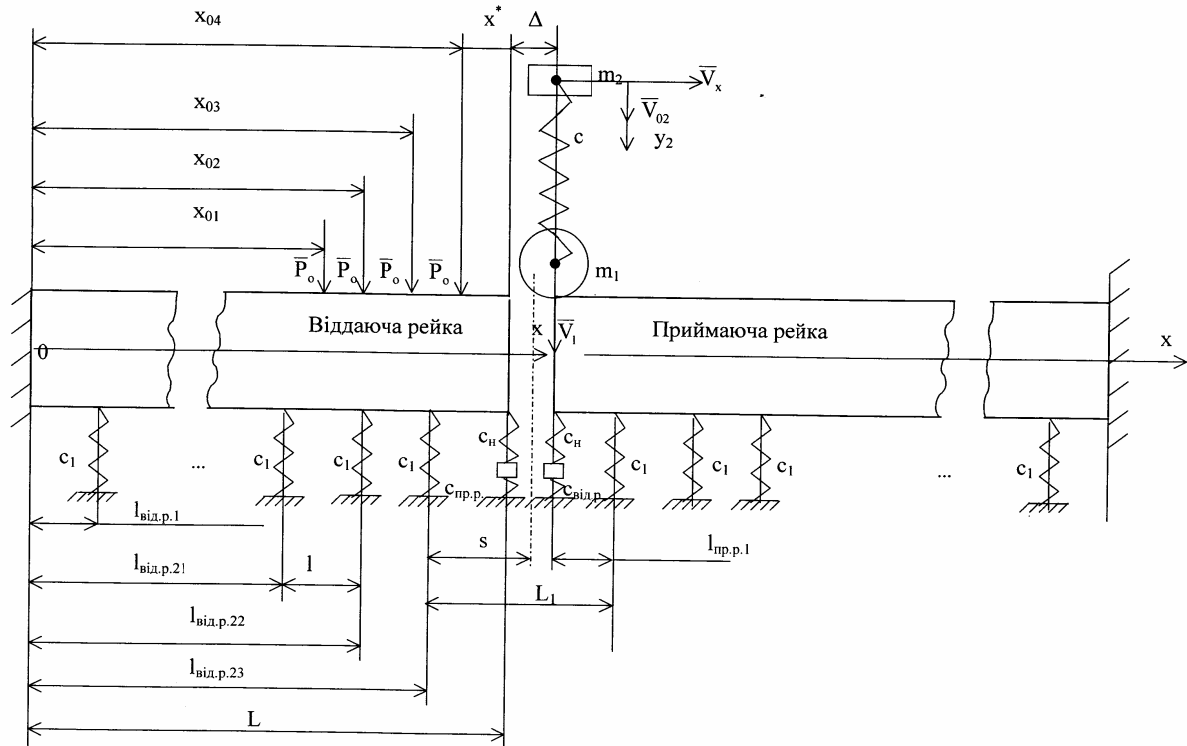


Рис.1 – Узагальнена розрахункова схема колії в зоні стику

$$w(t, x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) \cdot D_j(V_x, e, S_{\text{дв}}) \cdot \sin \omega_j t,$$

$$z^j(x) = \rho(\kappa_1^j x) z^j(0) + \frac{\varphi(\kappa_1^j x)}{\kappa_1^j} z^{j'}(0) + \frac{\psi(\kappa_1^j x)}{\kappa_1^{j^2}} z^{j''}(0) + \frac{\gamma(\kappa_1^j x)}{\kappa_1^{j^3}} z^{j'''}(0) + \left[ \frac{\kappa_2^{j^4} z^j(1^*)}{\kappa_1^{j^3}} + \right.$$

$$\left. + \frac{c}{EJ\kappa_1^{j^3}} (\lambda_2^j - \lambda_1^j) [\gamma(\kappa_1^j(x - 1^*))] \right|_{x \geq 1^*} - \frac{c_1}{EJ\kappa_1^{j^3}} \sum_{i=1}^{23} z^j(l_i) [\gamma(\kappa_1^j(x - l_i))] \Big|_{x \geq 1^*}, \quad (j = 1 \div 5),$$

$$\lambda_1^j = z_1^j(0), \quad \lambda_2^j = \frac{c\lambda_1^j}{c - m_2\omega_j^2}, \quad \kappa_1^{j^4} = \frac{\rho F}{EJ} \omega_j^2, \quad \kappa_2^{j^4} = \frac{m_1}{EJ} \omega_j^2.$$

$$z_1'(0) = 0; \quad z_1'''(0) = z_1(0) \frac{C_{\text{пр.п.к}}}{EJ};$$

$$\left. \begin{aligned} z_i(l_i) &= \rho(\kappa_1 l_i) z(0) + \frac{\varphi(\kappa_1 l_i)}{\kappa_1} z'(0) + \frac{\psi(\kappa_1 l_i)}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(\kappa_1 l_i)}{\kappa_1^3} z'''(0) - \\ &- \frac{c_1}{EJ\kappa_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma(\kappa_1(l_i - l_{i-1})) + \left[ \frac{\kappa_2^4 z(0)}{\kappa_1^3} + \frac{c}{EJ\kappa_1^3} (\lambda_2 - \lambda_1) [\gamma(\kappa_1(x - 1^*))]; \right. \\ z_{24}(L) &= 0; \quad z'_{24}(L) = 0; \end{aligned} \right\}$$

$$D_j = \frac{m_1 \lambda_1^j V_1 + m_2 \lambda_2^j V_{01}}{\omega^j \left[ \rho F \int_0^L z^{j^2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{j^2} + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}, \quad \text{при } x \neq 0;$$

$$D_j = \frac{\rho F V_1 z^j(0) + m_1 \lambda_1^j V_1 + m_2 \lambda_2^j V_{01}}{\omega^j \left[ \rho F \int_0^L z^{j^2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{j^2} + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}, \quad \text{при } x = 0;$$

$$S_{\text{дв}} = m_1 V_x (2 \cos \alpha_0 + 1) \sin \alpha_0 / 3; \quad \alpha_0 = \arccos((r - h) / r);$$

$$h = h_1 - h_2; \quad h_1 = y_{\text{вд.р.}}(L); \quad y_{\text{вд.р.}}(L) = y_{\text{вд.р.}}(x)|_{x=L};$$

$$y_{\text{вд.р.}}(x) = y_0 + y_0' x + \frac{1}{EJ} \left[ \sum_{i=1}^4 P_0 \frac{(x - x^*)^3}{6} + Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{i=1}^{23} c_i y_i(l_{\text{отд.р.}i}) \frac{(x - l_{\text{вд.р.}i})^3}{6} \right];$$

$$y_{\text{вд.р.}}(0) = 0; \quad y'_{\text{вд.р.}}(0) = 0; \quad y'_{\text{вд.р.}}(L) = 0; \quad y'''_{\text{вд.р.}}(L) = y_{\text{отд.р.}}(L) \frac{C_{\text{вд.р.к.}}}{EJ};$$

$$c_{\text{від.р.к.}} = \frac{c_n \cdot c_{\text{пр.р.}}}{c_n + c_{\text{пр.р.}}} ; c_{\text{пр.р.к.}} = \frac{c_n \cdot c_{\text{отд.р.}}}{c_n + c_{\text{отд.р.}}} ; h_2 = h_1 \frac{c_n}{c_n + c_{\text{пр.р.}}} ;$$

$$c_n = \frac{1}{V(0,0)} ;$$

$$V(0,0) = \frac{\Delta^3}{3E_n J_n} + \frac{e_n^2}{2J_n G_n} \Delta ; e_n = \sqrt{\frac{b_n h_n^2}{4}} ; c_{\text{пр.р.}} = \frac{1}{y_{\text{пр.р.}}(0)} ;$$

$$c_{\text{від.р.}} = c_{\text{пр.р.}} ; y_{\text{пр.р.}}(0) = y_{\text{пр.р.}}(x)|_{x=0} ;$$

$$y_{\text{пр.р.}}(x) = y_0 + y'_0 x + \frac{1}{EJ} \left( \frac{\bar{I} \cdot x^3}{6} - \sum_{i=1}^{23} c_i y_i (l_{\text{пр.р.}i}) \frac{(x - l_{\text{пр.р.}i})^3}{6} \right) ;$$

$$y''_{\text{пр.р.}}(0) = 0 ; y'''_{\text{пр.р.}}(0) = 0 ; y_{\text{пр.р.}}(L) = 0 ; y'_{\text{пр.р.}}(L) = 0 ,$$

де  $\bar{I}$  – вертикальна одинична сила;  $\Delta$  – середнє значення стику типу "ззор";  $x^* = r \cdot \sin \alpha_0 - \Delta$  – лінійна координата віддаючої рейки;  $r$ ,  $\alpha_0$  – радіус і кутова координата колеса;  $P$ ,  $P_0 = P/8$  – вагові характеристики транспортного засобу з урахуванням його завантаження;  $l_{\text{від.р.к.}} = L$  – геометрична координата віддаючої рейки (довжина рейки);  $L_1$  – відстань між осями симетрії останньої шпали віддаючої рейки і першою шпалою приймаючої рейок з урахуванням зазору  $\Delta$  стику ( $L_1 = l + \Delta$ );  $l$  – відстань між шпалами рейок колії;  $y_{\text{пр.р.}}(0)$  – прогин приймаючої рейки при  $x = 0$  і відсутніх накладках;  $y_{\text{пр.р.}}(l_i)$  – прогин приймаючої рейки під  $i$ -ю опорою;  $l_{\text{від.р.}i} = l_{\text{від.р.}23} - j \cdot l$  ( $i = 1 \div 22$ ,  $j = 23 - i$ ) – лінійна координата  $i$ -ї опори віддаючої рейки ( $l_{\text{від.р.}23} = L - e \cdot L_1 + \Delta/2$ );  $l_{\text{пр.р.}i} = l_{\text{пр.р.}1} + i \cdot l$  ( $i = 2 \div 23$ ) – координата  $i$ -ї опори приймаючої рейки ( $l_{\text{пр.р.}1} = L_1(1 - e) - \Delta/2$ );  $x_{0i}$  ( $i = 1 \div 4$ ),  $l$  – геометричні координати коліс транспортного засобу і пружних опор рейки;  $s = e \cdot L_1$  – геометрична координата віддаючої рейки;  $e$  – ексцентриситет віддаючої рейки в місці стику;  $S_{\text{ду}}$  – вертикальна складова сприйманого приймаючою рейкою з боку колеса ударного імпульсу.

Умовні позначки і найменування параметрів  $g$ ,  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\gamma$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $\bar{V}_1$ ,  $\bar{V}_{02}$ ,  $\bar{V}_x$ ,  $E$ ,  $J$ ,  $\rho$ ,  $F$ ,  $E_n$ ,  $J_n$ ,  $\rho_n$ ,  $F_n$ ,  $h$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  відповідають аналогічним у [1,7-9].

З метою встановлення наявності точок розриву і локальних екстремумів, були побудовані фрагменти поверхонь  $w(V_x, e)$  при  $V_x = [1 \div 15]$  м/с,  $e = [0,3 \div 0,5]$  для двох типів шпальної епюри (нормальна епюра – рис.2, а; посиленна – рис.2, б). Аналіз форми поверхонь

показав, що обидві вони відповідають частині поверхні еліптичного параболоїда, відносяться до класу монотонних як при  $V_x = \text{Var}$  і  $e = \text{const}$ , так і при  $V_x = \text{const}$  і  $e = \text{Var}$ , при цьому точки розриву і локальні екстремуми відсутні.

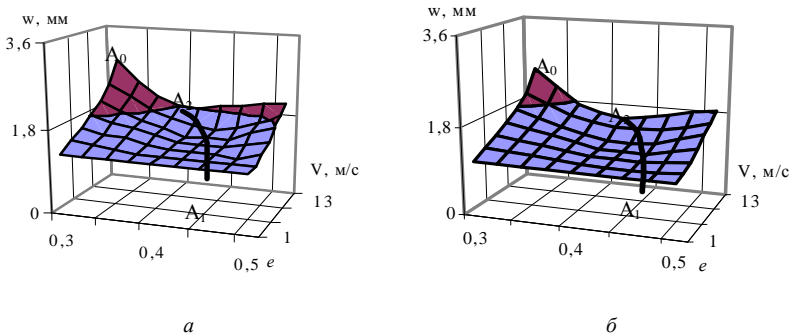


Рис.2 – Залежність  $w(V_x, e)$  при: а)  $L_1 = 1 + \Delta$ ; б)  $L_1 = 0,81 + \Delta$

Початкова точка  $A_0$  задачі оптимізації відповідала значенням  $V_x = 15$  м/с і  $e = 0,3$ . У кожному варіанті механічної взаємодії в механічній системі «вагон – рейкова колія» процес оптимізації закінчувався в точці  $A_1(V_x^{\text{опт}}, e^{\text{опт}})$ , що лежить на лінії  $w(V_x = 1 \text{ м/с}, e)$ .

Для підвищення ефективності застосування результатів оптимізації на практиці на поверхнях  $w(V_x, e) = \max w(t, x = I_{\text{пр.п.1}}(e), S_{\text{ду}}(V_x))$  були побудовані лінії  $A_1A_2$ , точки на яких відповідають значенням  $e_{\text{опт}}$  при швидкостях  $V_x = \text{const}$ , що змінюються дискретно в діапазоні  $V_x = [1 \div 15]$  м/с.

Проекції ліній  $A_1A_2$  на площину  $V_x O e$ , тобто залежності  $V_x^{\text{опт}}(e)$ , приведені на рис.3 (нормальна епюра) і рис.4 (підсилена епюра).

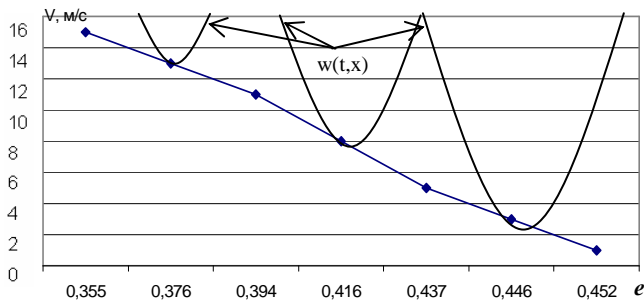


Рис.3 – Залежність швидкості  $V_x$  від величини параметра  $e$  при  $L_1 = 1 + \Delta$

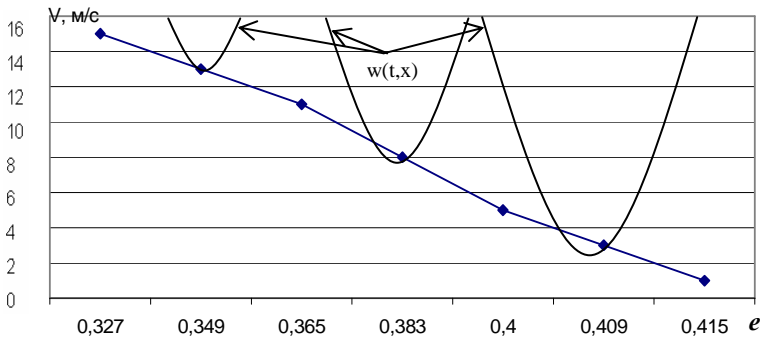


Рис.4 – Залежність швидкості  $V(e)$  при  $L_1 = 0,81 + \Delta$

Розглянуто, з огляду на залежності прогинів приймаючої рейки під першою шпалою від величини стиковошпального ексцентриситету, а також величини ударного імпульсу  $S_{\text{ду}}$  від геометричних параметрів стику, два варіанти задачі оптимізації.

*Варіант 1.* Відповідає дослідженням залежності величини швидкості руху вагона, що мінімізує максимальний прогин для випадку, коли шпальна епюра є нормальною, тобто коли на рис.1:  $L_1 = l + \Delta$ . Результати даних досліджень приведені на рис.3.

*Варіант 2.* Відповідає випадку взаємодії транспортного засобу з рейковою колією у варіанті посиленої шпальної епюри, тобто коли  $L_1 = 0,81 + \Delta$ . Даному випадку відповідає рис.4.

Також було прийнято:  $c = 4,225 \cdot 10^5$  Н/м;  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м;  $r = 0,35$  м;  $m_1 = 1100$  кг;  $m_2 = 5940$  кг;  $\Delta = 19,8$  мм.

Аналіз графіків показує наступне.

1. Швидкість руху транспортного засобу, що забезпечує мінімізацію критерію  $\min_{V_x, e} \left[ \max_t w(t, x = l_{\text{пр.п.1}}(e)) \right]$  при проходженні вагоном зони колії зі стиковою нерівністю (оптимальна швидкість  $V_x^{\text{опт.}}$ ), є монотонно-убутною функцією стикового ексцентриситету колії незалежно від типу шпальних ґрат. Установлено, наприклад, що швидкість  $V_x^{\text{опт.}}$ , що мінімізує прогин приймаючої рейки, змінюється в діапазоні  $V_x = [1 \div 15]$  м/с (збільшується в 15 разів) при зміні ексцентриситетів нормальних і посилених шпальних ґрат у діапазонах  $e = [0,452 \div 0,355]$  і  $e = [0,415 \div 0,327]$  відповідно.
2. Якщо на ділянці колії зі стиковою нерівністю швидкість транспортного засобу обмежена нормативним значенням  $V_x = V_x^{\text{норм.}}$ , то

для виконання умови  $V_x^{\text{норм.}} = V_x^{\text{опт.}}$  (при  $w_{\text{пр.р.}} = \min$ ) перехід від нормальних шпальних грат до посилених викликає необхідність збільшення (конструктивно) стикового ексцентриситету верхньої будови колії. Наприклад, при  $V_x^{\text{норм.}} = 11 \text{ м/с} = \text{const}$ , відзначений перехід вимагає зміни ексцентриситету стику на 6,8%, зі значення  $e = 0,39$  на оптимальне значення  $e^{\text{опт.}} = 0,365$  відповідно.

3. Встановлена особливість залежності величини оптимальної швидкості руху вагона  $V_x^{\text{опт}}$  від типу шпальних грат при  $e = \text{const}$ . Наприклад, швидкість руху вагона, що мінімізує максимальний прогин приймаючої рейки під першою шпалою, при  $e = 0,38 = \text{const}$  і переході від нормальних шпальних грат до посилених, по величині знижується на 42% і відповідає значенням  $V_x^{\text{опт}} = 12,42 \text{ м/с}$  і  $V_x^{\text{опт}} = 8,42 \text{ м/с}$ .
4. Вибір швидкості руху транспортного засобу на ділянках колії зі стиковими нерівностями величиною  $V_x^{\text{опт}}$ , при якій досягаються найменші рівні ударної взаємодії вагона з приймаючою рейкою стику для заданих значень механічних і конструктивних параметрів вагона і стикового з'єднання, а також типів стикової шпальної епюри забезпечує найменші рівні ударної взаємодії вагона з приймаючою рейкою стику, зниження осідання колій, а отже, і підвищення тривалості терміну експлуатації транспортного засобу і рейкової колії. Наприклад, якщо вагон, що проходить рейковий стик, має параметри:  $c = 4,225 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ ;  $r = 0,35 \text{ м}$ ;  $m_1 = 1100 \text{ кг}$ ;  $m_2 = 5940 \text{ кг}$ , а стикове з'єднання рейкової колії (рейка Р-65) виконано у виді шпальних грат з нормальною епюрою, ексцентриситетом  $e = 0,416$  і має зазор  $\Delta = 19,8 \text{ мм}$ , то його швидкість руху, що мінімізує динамічну взаємодію колеса з рейкою в місці стикової нерівності, а також і прогини приймаючої рейки під першою шпалою, повинна бути рівної  $V_x = 8 \text{ м/с}$ .

Результати досліджень використовуються на практиці при розробці швидкісних режимів руху вагонів з урахуванням їх завантаження, жорсткості підвісок проєктованих і вдосконалюваних вагонів, а також реального стану рейкової колії, що визначається жорсткістю баластового шару, місцем розташування, типом і конструктивними характеристиками стикових з'єднань колій. У цьому випадку швидкість руху вагона забезпечує найменші значення параметрів динамічної взаємодії вагона з рейковою колією у місці стикової нерівності, а також осідання колій в місці стику під першою шпалою приймаючої рейки.



- 1.Шпачук В.П., Коваленко А.В. Влияние конструкций стыковых соединений рельсов на надежность путей и потребление ресурсов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.49. – К.: Техніка, 2003. – С.202-206.
- 2.Чернышев М.А. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: ВЗИИТ, 1962. – 163 с.
- 3.Устройство, ремонт и текущее содержание железнодорожного пути /Под ред. С.В.Амелина. – М.: Транспорт, 1991. – 271 с.
- 4.Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. Основи динаміки вагонів. – К.: КУЕТТ, 2003. – 270 с.
- 5.Иванов П.С., Исаенко Э.П. Стык можно усилить // Путь и путевое хозяйство. – 1992. – №1. – С.5-7.
- 6.Способ стыковки рельсов звеньевому пути: А.С. №2037597 Российская Федерация, Е 01 В 11/00 / П.С.Иванов, Э.П.Исаенко, А.Ж.Сейкетов и др.; Оpubл. 19.06.95. Бюл. №17.
- 7.Шпачук В.П., Коваленко А.В. Прогнбы рельсового пути в месте изолированной стыковой неровности с учетом фаз доударного баллистического и послеударного безотрывного движений // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.63. – К.: Техніка, 2003. – С.216-225.
- 8.Коваленко А.В. Ударное взаимодействие трамвая с принимающим рельсом в месте изолированной стыковой неровности // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2005. – №2/2 (14). – С.31-33.
- 9.Шпачук В.П., Коваленко А.В., Головина Е.А., Плотницька Я.В. Повышение ресурса подвижного состава и верхнего строения трамвайного пути путем внедрения перспективных технологий снижения параметров их ударно-динамического взаимодействия // Проблеми та перспективи енерго-, ресурсозбереження житлово-комунального господарства: Матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф. – Алушта: ХО НТТ КГ та ПО, ХНАМГ, 2006. – С.150-154.

*Отримано 14.01.2008*

УДК 658

**И.С.САМУЙЛОВА, В.С.ВИНИЧЕНКО**, канд. техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НА МАРШРУТНОЙ СИСТЕМЕ ТРАМВАЯ В г.ХАРЬКОВЕ**

Рассматривается современное состояние и перспективы развития городского электротранспорта в г.Харькове.

Высокие темпы развития благосостояния и культурного уровня общества в городах предъявляют все возрастающие требования к совершенствованию функций транспортной сети. Транспортные системы больших городов часто оказываются не в состоянии выполнять свою важнейшую функцию – сокращение затрат времени на передвижение пассажиров, несмотря на значительные капиталовложения в развитие транспортных и маршрутных сетей.

Анализ литературных источников показывает, что спрос на услуги различных видов городского пассажирского транспорта динамичен